

ЭПТ 2015



ACED 2015

УДК 621.313.3

3.1. ОЦЕНКА НЕОБХОДИМОСТИ УЧЕТА ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ПАРАМЕТРОВ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

ASSESSMENT THE NECESSITY FOR TAKING INTO ACCOUNT TEMPERATURE DEPENDENCE OF THE PARAMETERS OF THERMODYNAMIC MODEL OF ASYNCHRONOUS MOTORS

Зюзов Анатолий Михайлович, д-р техн. наук, профессор каф. Электропривода и автоматизации промышленных установок Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н.Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: a.m.zyuzev@urfu.ru, Тел.: +79126348363

Метельков Владимир Павлович канд. техн. наук, доцент каф. Электропривода и автоматизации промышленных установок Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н.Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: v.p.metelkov@urfu.ru, Тел.: +79122849061

Anatoliy M. Zyuzev, Doctor Sc., Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: a.m.zyuzev@urfu.ru, Ph.: +79126348363

Vladimir P. Metelkov, Cand. Sc., Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: v.p.metelkov@urfu.ru, Ph.: +79122849061

Аннотация: В работе рассматривается влияние температурного изменения сопротивления обмоток асинхронного двигателя, а также теплоемкостей и тепловых проводимостей на результаты расчетов с использованием термодинамической модели, построенной с использованием метода тепловых схем. Показано влияние указанных зависимостей на установившиеся температуры элементов машины, а также на постоянные времени термодинамических переходных процессов. Сформулированы условия, для которых учет температурной зависимости параметров является актуальным.

Abstract: The paper deals with the influence of temperature changes in the resistance of the windings of the asynchronous motor, as well as heat capacity and thermal conductivity on the results of calculations using the lumped thermodynamic model. Shows the influence of these dependencies to steady-state value of the temperature of the motor elements, as well as on the time constants of the thermodynamic transients. The conditions for which accounting the temperature dependence of the parameters is important are formulated.

Ключевые слова: асинхронный двигатель; термодинамическая модель; нагрев; погрешность расчета; тепловая схема.

Key words: asynchronous motor; thermodynamic model; heating; calculation error; lumped model.

При создании термодинамических моделей электрических машин зачастую принимаются допущения о независимости параметров модели от температуры. Это может быть оправдано при проведении исследований на стадии проектирования электрической машины, когда моделирование нагрева выполняется, как правило, для установившегося номинального режима работы. В то же время, при создании таких моделей для использования их в задачах электропривода, необходимо учитывать возможность изменения температуры элементов машины в широком диапазоне, когда

температурная зависимость параметров модели может проявляться в полной мере.

В работе ставится задача анализа влияния зависимости параметров термодинамической модели от теплового состояния машины на значения температур ее узлов в статическом и динамических режимах.

Увеличение удельного электрического сопротивления металлов (ρ) при росте температуры является известным фактом, который принято учитывать следующей формулой [1]:

$$\rho = \rho_{st} [1 + k_\theta (\theta - \theta_{st})], \quad (1)$$

где ρ_{st} – удельное сопротивление при некоторой фиксированной (базисной) температуре θ_{st} , относительно которой рассчитывается его изменение, Ом·м; k_θ – температурный коэффициент изменения сопротивления, K^{-1} .

Анализ выражения (1) позволяет сделать вывод о том, что учет температурного изменения сопротивления при термодинамическом моделировании электродвигателей очень важен, поскольку в актуальном диапазоне изменения температур обмоток удельное сопротивление может изменяться в 1,5 раза и более. Так, при изменении температуры медной обмотки от 20°C до верхней границы допустимого превышения температуры по ГОСТ 52776-2007 «Машины электрические вращающиеся. Номинальные данные и характеристики», для изоляции классов В, F и H ее сопротивление изменяется на 32,4%, 42,57% и 50,68% соответственно.

Теплоемкости элементов конструкции электрической машины значительно слабее зависят от температуры, чем сопротивления обмоток. В табл. 1 приведены отношения теплоемкостей $C_{\theta_{max}}/C_{20}$, где $C_{\theta_{max}}$ – теплоемкость при температуре, соответствующей допустимому превышению температуры обмотки статора по ГОСТ 52776-2007 «Машины электрические вращающиеся. Номинальные данные и характеристики», для изоляции классов В, F и H; C_{20} – теплоемкость при 20°C. Для железа в качестве θ_{max} принималась температура, соответствующая диапазону 75...85% от допустимого превышения температуры обмотки статора по ГОСТ.

Таблица 1

Металл	В	F	H
Медь	1,027	1,035	1,041
Алюминий	1,043	1,056	1,066
Железо	1,057...1,064	1,075...1,084	1,089...1,101

Зависимости теплопроводности от температуры для металлов и воздуха носят противоположный характер. В [2, 3] приведены данные по теплопроводности меди, согласно которым при увеличении температуры от 300 до 400 °K теплопроводность меди уменьшается лишь на 2,0%, что позволяет считать ее постоянной в актуальном для моделирования электрических машин температурном диапазоне. Аналогично, в [2, 3] приведены данные по теплопроводности алюминия, согласно которым при увеличении температуры от 300 до 400 °K теплопроводность алюминия уменьшается лишь на 1,27%, что также позволяет считать ее постоянной в актуальном температурном диапазоне.

Теплопроводность чугуна зависит от его химического состава, но, по данным в [4], для обыкновенного чугуна при изменении температуры от 0 до 100 °C она уменьшается незначительно, в пределах 3,6...5,1%. В то же время, уменьшение теплопроводности электротехнической стали при увеличении температуры выражено значительно сильнее, чем у меди, алюминия и чугуна. Она может уменьшаться на 20...25% при увеличении температуры на 40°C. Зависимость удельной теплопроводности стали от температуры может быть аппроксимирована выражением следующего вида:

$$\lambda_{уд.ст} = (a_\lambda \theta^2 + b_\lambda \theta + c_\lambda)^{-1}, \quad (2)$$

где постоянные коэффициенты, например, для усредненных значений удельной теплопроводности стали 2013 имеют величины: $a_\lambda = -1,321 \cdot 10^{-6}$; $b_\lambda = 2,634 \cdot 10^{-4}$; $c_\lambda = 1,869 \cdot 10^{-2}$.

Теплопроводность воздуха практически линейно растет при росте температуры [1, 5]. Экспериментальные данные, представленные в [1] очень хорошо аппроксимируются (среднее квадратичное отклонение 0,07%) линейной функцией:

$$\lambda_v = 7,078 \cdot 10^{-5} \theta + 0,0237. \quad (3)$$

Из (3) следует, что теплопроводность воздуха изменяется весьма существенно в диапазоне температур, характерном для электродвигателей. Однако следует отметить, что тепловые потоки от обмотки двигателя к охлаждающему воздуху могут включать в себя воздушные участки (например, воздух во внутреннем корпусе закрытого двигателя), на результирующие тепловые проводимости по таким путям будут влиять тепловые проводимости и через металл, и через воздух, которые зависят от температуры разнонаправлено, благодаря чему будет происходить частичная компенсация температурного влияния.

Проанализируем влияние изменения параметров модели на статические и динамические показатели. Из уравнения теплового баланса для i -го узла термодинамической модели с учетом (1) можно получить дифференциальное уравнение, описывающее изменение температуры элементов термодинамической модели:

$$C \frac{d\theta}{dt} = \Delta P' + \Lambda \theta. \quad (4)$$

В (4) обозначено: $\Delta P' = [\Delta P'_1 \Delta P'_2 \dots \Delta P'_n]^T$ – матрица-столбец мощностей потерь в узлах модели размерностью $n \times 1$; $\theta = [\theta_1 \theta_2 \dots \theta_n]^T$ – матрица-столбец температур узлов размерностью $n \times 1$; $C = \text{diag}[C_1 C_2 \dots C_n]$ – диагональная матрица теплоемкостей узлов размерностью $n \times n$; Λ –

матрица тепловых проводимостей размерностью $n \times n$.

Составляющие $\Delta P_{st,i} k_{\theta i}$ аддитивно входят в диагональные элементы матрицы \mathbf{A} . Это означает, что учет температурной зависимости сопротивления обмоток не нарушает линейность математического описания термодинамической модели, но от этого фактора зависит величина собственных чисел матрицы системы (4) $\mathbf{A} = \mathbf{C}^{-1} \mathbf{A}$, что отражается на динамике переходных процессов. В табл. 2 приведены значения собственных чисел матрицы \mathbf{A} для 6-массовой термодинамической модели двигателя 4A100L4 закрытого исполнения (модели включают в качестве своих узлов обмотку статора с разделением на лобовые и пазовую части, сталь статора, внутренний воздух, ротор и корпус). Учитывалось влияние температуры на сопротивление обмоток при изменении момента нагрузки на валу (M/M_N).

Таблица 2

Двигатель 4A100L4			
M/M_N	0	1,0	2,0
$\chi_{(A)k} \cdot 100, \text{ 1/с}$	-361.78	-361.78	-361.78
	-10.219	-10.129	-9.859
	-2.504	-2.438	-2.257
	-1.084	-1.062	-0.988
	-0.0594	-0.0427	0.0165
	-0.2781	-0.2578	-0.2005

Из табл. 2 видно, что температурное изменение сопротивления обмоток очень слабо влияет на наибольшие собственные числа, которые определяют наименьшие постоянные времени переходных процессов (порядка нескольких минут и менее). Однако оно сильно влияет на большие постоянные времени. Отметим, что смена знака хотя бы одного собственного числа говорит о возможности неограниченного роста температуры без выхода на установившийся режим.

Вектор установившихся температур, определяется произведением $\mathbf{A}^{-1} \Delta \mathbf{P}'$. На рис. 1 приведены графики отношения превышения температуры лобовых частей обмотки статора с учетом температурного изменения сопротивления ($\tau_{уст}$) к превышению температуры без учета этого фактора ($\tau_{уст0}$) для 6-массовых моделей двигателей 4A100L4 и 4A225M4. Видно очень существенное влияние температурного изменения сопротивления, происходящего при изменении нагрузки на валу двигателя, на уровень установившейся температуры обмотки.

Как было отмечено выше, теплопроводности стали и воздуха при изменении температуры могут меняться весьма значительно, изменяясь противоположно. Поэтому представляет интерес анализ влияния их температурного изменения,

когда эти материалы находятся в составе термодинамической модели реального двигателя. Также проведем аналогичную оценку влияния температурного изменения теплоемкостей. Рассмотрим этот вопрос на примере 6-массовой термодинамической модели двигателя 4A100L4.

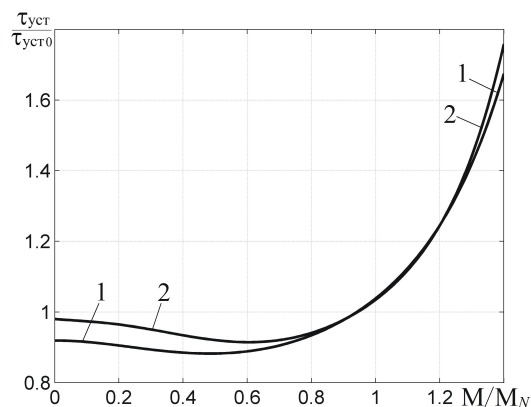


Рис. 1. Графики отношения $\tau_{уст}/\tau_{уст0}$ для лобовых частей обмотки статора двигателей 4A100L4 (1) и 4A225M4 (2)

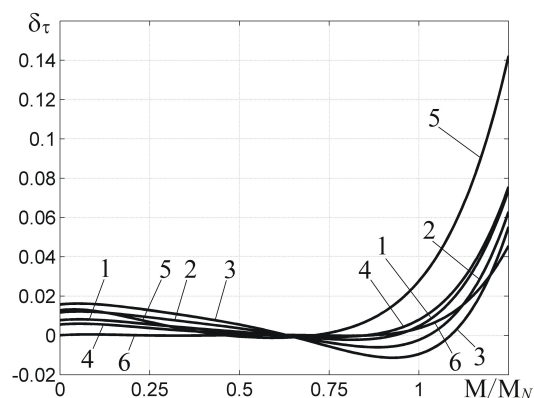


Рис. 2. Графики погрешности δ_τ . Обозначено: Лобовые части обмотки — 1; Пазовая часть обмотки — 2; Статор — 3; Внутренний воздух — 4; Ротор — 5; Корпус — 6

На рис. 2 показаны графики погрешности расчета установившегося превышения температур узлов термодинамической модели $\delta_\tau = (\tau_{уст0i} - \tau_{устi})/\tau_{устi}$ в функции относительной величины момента двигателя (4A100L4), где $\tau_{устi}$ — превышение температуры элементов термодинамической модели с учетом температурного изменения теплопроводностей; $\tau_{уст0i}$ — превышение температуры без учета температурного изменения теплопроводностей (по средним значениям температурного диапазона), i — номер узла термодинамической модели.

Из рис. 2 следует, что в диапазоне температур, не превышающих значения, соответствующие номинальному режиму работы (θ_{Nt}), погрешность расчета не существенна и не превышает 3%. В то же время видно, что игнорирование

температурной зависимости теплопроводности может приводить к существенным ошибкам расчета при температурах, превышающих θ_{Ni} . Так, при расчете установившегося превышения температуры лобовых частей обмотки статора двигателя 4A100L4 при нагрузке в 140% номинального момента с учетом температурного изменения теплопроводностей получаем 195,8°C, а без учета 240,7°C. Учитывая экспоненциальный характер зависимости скорости термического старения изоляции обмотки от ее температуры [6], подобное расхождение следует считать не приемлемым для задач оценки теплового состояния двигателя.

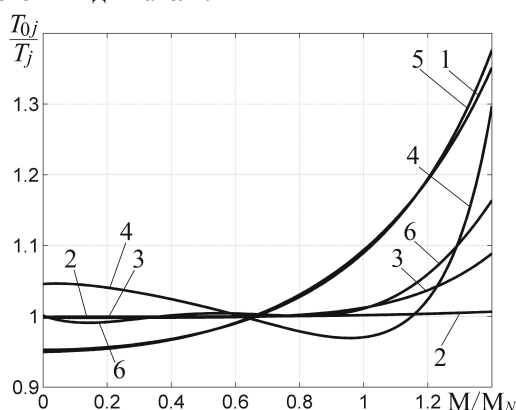


Рис. 3. Графики отношения T_{0j}/T_j . Цифрами обозначены номера постоянных времени в порядке возрастания их величины.

На рис. 3 показаны графики отношения постоянных времени T_{0j}/T_j 6-массовой термодинамической модели двигателя 4A100L4 в функции относительной величины момента двигателя, где T_{0j} – постоянные времени без учета температурной зависимости теплоемкостей и теплопроводностей; T_j – постоянные времени с учетом температурной зависимости этих параметров; j – номер постоянных времени в

порядке возрастания их величины. Кривые на рис. 3 позволяют заключить, что при расчетах процессов, в ходе которых температуры узлов модели существенно превышают значения θ_{Ni} , необходим учет влияния температуры на постоянные времени из-за температурных зависимостей теплоемкостей и теплопроводностей, так как при $\theta_i > \theta_{Ni}$ разница между T_j и T_{0j} оказывается существенной для трех наибольших постоянных времени.

ВЫВОДЫ

1. Проведенный анализ показывает важность учета температурного изменения сопротивления обмоток при построении термодинамических моделей электрических машин. В том числе и таких моделей, которые ориентированы на использование для приводов, работающих в повторно-кратковременном режиме с небольшими по длительности периодами нагружения. Здесь изменение температуры обмоток будет незначительным в пределах цикла, но средний уровень температуры узлов модели будет существенно зависеть от факта учета температурного изменения сопротивлений.
2. Температурную зависимость тепловых проводимостей и теплоемкостей меди и алюминия в большинстве случаев можно не учитывать.
3. Игнорирование температурной зависимости теплопроводностей воздуха и стали, а также теплоемкости Fe-содержащих элементов машины может приводить к заметным ошибкам расчета при моделировании работы электропривода в повторно-кратковременных режимах, когда температуры обмоток и стали на отдельных участках цикла существенно превышают величины θ_{Ni} .

4. Казанцев Е.И. Промышленные печи. Справочное руководство для расчетов и проектирования. 2-е издание, дополненное и переработанное. М.: Металлургия, 1975. 368 с.
5. Сипайлов Г.А., Санников Д.И., Жадан В.А. Тепловые гидравлические и аэродинамические расчеты в электрических машинах – М.: Высш. шк., 1989. 239 с.
6. Котеленец Н.Ф., Кузнецов Н.Л. Испытания и надежность электрических машин: Учеб. пособие для вузов. М.: Высш. шк., 1988. 232 с.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Готтер. Г. Нагревание и охлаждение электрических машин. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1961. 480 с.
2. Зиновьев В.Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах. М.: Металлургия, 1989. 384 с.
3. Теплопроводность твердых тел: Справочник / А.С. Охотин, Р.П. Боровикова, Т.В. Нечаева, А.С. Пушкарский. М.: Энергоатомиздат, 1984. 320 с.